

SISTEMA DE EVALUACIÓN Y AVISO DE TORMENTAS DE POLVO Y ARENA (WMO SDS-WAS)

Enric Terradellas⁽¹⁾, José M. Baldasano⁽²⁾, Emilio Cuevas⁽³⁾, Francesco Benincasa⁽⁴⁾

⁽¹⁾ AEMET, Barcelona, eterradellasj@aemet.es

⁽²⁾ BSC-CNS, Barcelona, jose.baldasano@bsc.es

⁽³⁾ AEMET, Santa Cruz de Tenerife, ecuevasa@aemet.es

⁽⁴⁾ BSC-CNS, Barcelona, francesco.benincasa@bsc.es

Introducción

Cuando el viento es moderado o fuerte, puede levantar grandes masas de polvo y arena procedentes de suelos secos y desnudos e incorporarlas a la circulación atmosférica. Las partículas de menor tamaño pueden viajar durante varios días hasta distancias de centenares o millares de kilómetros antes de ser depositadas nuevamente sobre el suelo. Para países situados en zonas áridas o a sotavento de las mismas, el polvo atmosférico supone una grave amenaza para el medio ambiente, la salud humana y la economía. Además, la interacción del polvo con procesos atmosféricos como la radiación o la microfísica de nubes hace imprescindible su incorporación tanto a los modelos climáticos como a los de predicción numérica del tiempo. La Organización Meteorológica Mundial tomó la iniciativa de desarrollar e implementar un Sistema de Evaluación y Aviso de Tormentas de Polvo y Arena (WMO SDS-WAS). La Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) y el Barcelona Supercomputing Center – Centro Nacional de Supercomputación (BSC-CNS) albergan el Centro Regional para el Norte de África, Oriente Medio y Europa del programa WMO SDS-WAS.

Los principales objetivos del Centro Regional pueden resumirse en los siguientes puntos:

- Liderar el desarrollo y la implementación de un sistema completo de observación y predicción del polvo atmosférico.
- Facilitar el acceso de los usuarios a la información.
- Instruir a los países en el uso de las observaciones, análisis y predicciones suministrados.

Pueden consultarse los productos e informaciones elaborados por el Centro Regional en su página web <http://sds-was.aemet.es>

En las siguientes secciones se describen las actividades del Centro.

Observación del polvo atmosférico

El primer objetivo del Centro Regional consiste en liderar el desarrollo e implementación de un sistema completo de observación y predicción del polvo atmosférico. Un sistema de observación es indispensable para el seguimiento continuo del polvo, para la verificación de los productos de predicción y para una futura asimilación de datos en modelos numéricos.

Los sistemas de observación disponibles en la actualidad son los siguientes:

- Medidas in-situ
- Observaciones indirectas (visibilidad)
- Teledetección terrestre pasiva: fotómetros solares
- Teledetección terrestre activa: lidar
- Teledetección desde satélite

Para la estimación del contenido de polvo en superficie se dispone en primer lugar de las medidas in-situ suministradas por las estaciones de seguimiento de calidad del aire. Estas medidas proporcionan información sobre la concentración total de partículas suspendidas en la atmósfera (TSP), o de aquellas cuyo diámetro aerodinámico es inferior a 10, 2.5 ó 1 μm (PM10, PM2.5, PM1), pero no permiten distinguir entre polvo mineral y otros tipos de partículas (naturales o antropogénicas) salvo que se realicen a posteriori laboriosos análisis en el laboratorio. El diseño de las redes está habitualmente dirigido al control de la contaminación antrópica, por lo que la mayoría de las estaciones están ubicadas en núcleos urbanos o cerca de infraestructuras viarias o complejos industriales, enmascarando así la presencia de otras partículas. Finalmente, estas redes son corrientes en Europa, pero muy escasas y raramente con acceso a tiempo real a los datos en zonas desérticas, cerca de las principales fuentes de polvo mineral.

El Centro Regional ofrece acceso a tiempo casi-real a las medidas realizadas en 15 estaciones. La mayoría de estas estaciones han sido seleccionadas por estar ubicadas en ambientes rurales y alejadas de focos importantes de emisión de contaminantes

antropogénicos. La Figura 1 muestra los elevados valores registrados en la estación de Gharb, en Malta, el día 10 de marzo de 2012, asociados a una importante intrusión de polvo sobre el Mediterráneo. Estos valores descendieron muy bruscamente a causa de las fuertes lluvias registradas unas horas más tarde. Cabe destacar la publicación de datos de una estación ubicada en la sede central de la Autoridad Meteorológica Egipcia, en El Cairo. Aunque la estación está instalada en la ciudad más poblada de África, con un área metropolitana de 18 millones de habitantes y graves problemas de contaminación asociada al tráfico y a la industria, está relativamente cerca de importantes fuentes de polvo mineral y proporciona, por ello, una información sumamente útil

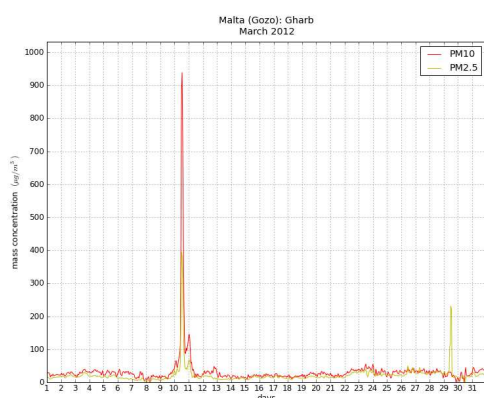


Fig. 1.- Valores de PM10 y PM2.5 medidos en la estación de Gharb (isla de Gozo, Malta) el mes de marzo de 2012.

Una alternativa a las medidas in-situ son las observaciones de visibilidad presentes en los informes meteorológicos elaborados en estaciones sinópticas o en oficinas meteorológicas de aeródromos. Se trata de una información disponible a tiempo real, aunque indirecta y cualitativa. Es importante considerar la información de tiempo presente para descartar reducciones de visibilidad asociadas a otros fenómenos atmosféricos, en especial hidrometeoros.

El Centro Regional ofrece acceso a tiempo real a los datos de visibilidad y tiempo presente de un gran número de estaciones de la región. La Figura 2 muestra las importantes reducciones de visibilidad registradas el 12 de abril de 2011 en Oriente Medio durante un destacado episodio de polvo.

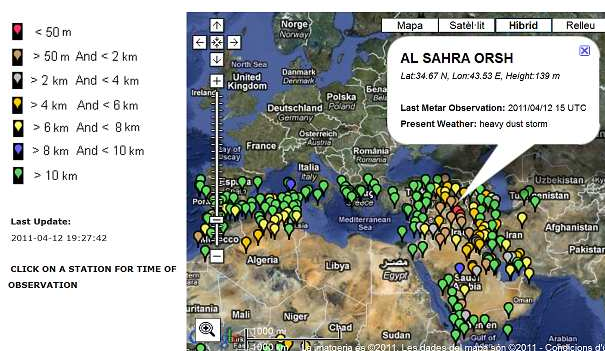


Fig. 2.- Valores de visibilidad registrados el 12 de abril de 2011.

Para la estimación del contenido de polvo en niveles superiores hay que recurrir a productos de teledetección. Las medidas realizadas mediante fotómetros solares permiten estimar, entre otras propiedades, el espesor óptico de aerosoles (AOD), una medida de la fracción de radiación solar absorbida o dispersada por partículas (Duvovik et al., 2000). La Figura 3 muestra el progresivo aumento del AOD registrado el 5 de abril de 2011 en la estación del cabo Roca (Portugal), durante una destacada irrupción de polvo sahariano sobre Europa Occidental. El mayor inconveniente de este tipo de medidas consiste en que sólo son posibles de día y con cielo despejado.

El Centro Regional ofrece acceso a los datos de la red AERONET (AERonet RObotic NETwork), una red de fotómetros solares que miden radiación solar directa y difusa en varias longitudes de onda de las bandas visible e infrarroja del espectro. Como sucedía con las medidas in-situ, el AOD integra el efecto de los distintos tipos de partículas. No obstante, la variación espectral del AOD proporciona información sobre la naturaleza de las mismas (Gibbs et al., 2007).

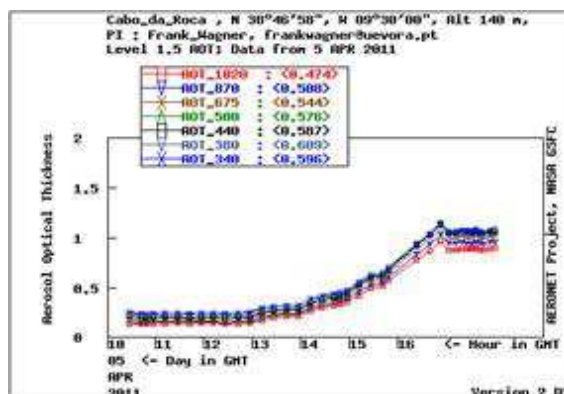


Fig. 3.- AOD registrado el 5 de abril de 2011 en la estación AERONET del cabo Roca (Portugal), gestionada por la Universidad de Évora.

La red cuenta con casi 1,000 estaciones, de las cuales unas 300 están activas en la actualidad. Sin

embargo, existen muy pocas estaciones en África, especialmente cerca del Sáhara, la principal fuente de polvo mineral en el mundo. Por ello, el Centro de Investigación Atmosférica de Izaña ha desarrollado el proyecto SDS-África, consistente en la instalación de una red de fotómetros solares en emplazamientos seleccionados de África Septentrional que permita seguir las tormentas de arena en tiempo real, validar sensores de satélites, verificar predicciones de modelos y caracterizar la capa de aire sahariano. Hasta el momento se han instalado equipos en Tamanrasset (Argelia), El Cairo (Egipto) y Ouarzazate (Marruecos).

Sólo la teledetección activa usando sistemas lidar permite una estimación del perfil vertical de la concentración y las propiedades ópticas de partículas. La European Aerosol Research Lidar Network (EARLINET) y la Micro Pulse Lidar Network cubren el territorio europeo con una resolución de 500 a 1,000 km, pero no hay ninguno de estos equipos instalado cerca de las fuentes de polvo. Esta deficiencia podría resolverse en el futuro con la nueva generación de ceilómetros. Estos equipos, totalmente automáticos y más robustos y económicos que los actuales sistemas lidar, permiten obtener perfiles verticales de retrodispersión. La Figura 4 muestra claramente la capa de polvo que se extendía a unos 2 km de altitud sobre Tenerife el día 8 de diciembre de 2011

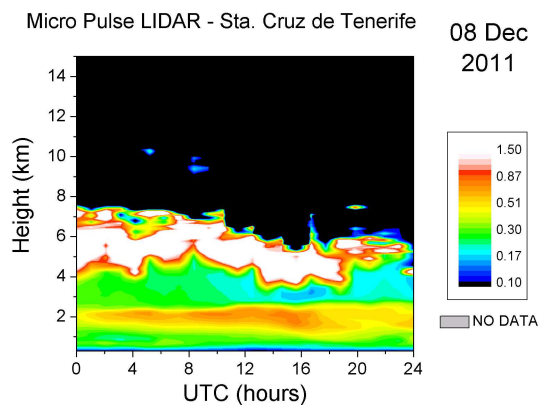


Fig. 4.- Perfil de retrodifusión obtenido a partir de medidas del lidar de micropulsos de Santa Cruz de Tenerife del 8 de diciembre de 2011

Las imágenes de satélite ordinarias, tanto las procedentes de canales visibles como las de infrarrojos, proporcionan resultados desiguales en la detección de polvo. Su eficacia depende de la hora del día o del contraste con la superficie subyacente y generalmente mejora con el uso de bucles temporales de imágenes sucesivas. Una forma más eficaz de identificar las masas de polvo consiste en el uso de productos elaborados mediante la combinación de distintos canales. El Centro Regional facilita el acceso al producto RGB-dust de EUMETSAT, generado a partir de las medidas

realizadas por el radiómetro SEVIRI, que viaja a bordo de los satélites Meteosat Segunda Generación. Este producto ofrece una detección cualitativa de las nubes de polvo con una buena resolución espacial y temporal y una excelente y permanente cobertura del área de referencia del Centro. La Figura 5 muestra en color rosáceo una gran masa de polvo sobre la región central del Sáhara.

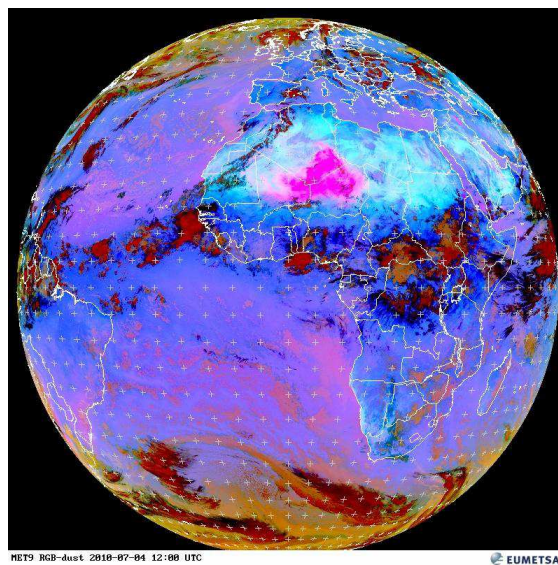


Fig. 5.- Imagen RGB-Dust de EUMETSAT del día 4 de julio de 2010 a las 12 U.T.C.

Distintos equipos están trabajando en la obtención de estimaciones cuantitativas de AOD a partir de las medidas del radiómetro SEVIRI, aunque por el momento el único producto que se distribuye de forma rutinaria es el generado por el U. K. Met Office. Esta estimación, que se realiza solo sobre tierra y en zonas libres de nubes, se basa en una relación empírica entre la radiación infrarroja recibida por el satélite y el espesor óptico de polvo (DOD) a 550 nm (Legrand et al., 2001; Brindley y Russell, 2009). En la Figura 6, correspondiente al 18 de marzo de 2012 a 12:00 U.T.C. se aprecian amplias masas de polvo sobre el Sahel y sobre la Península Arábiga.

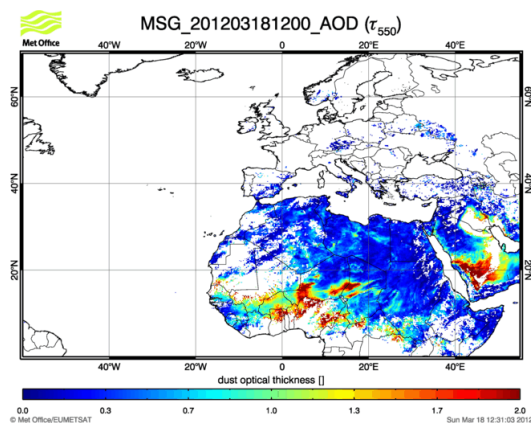


Fig. 6.- Estimación del DOD correspondiente al día 18 de marzo de 2012 a las 12:00 U. T. C. realizada por el U. K. Met Office.

Los productos elaborados a partir de instrumentos como MODIS (Figura 7), SeaWifs, OMI, AVHRR o CALIPSO, que están instalados en satélites de órbita polar, tienen una menor resolución temporal y carecen de cobertura permanente. En cualquier caso, pueden ayudar a estimar la distribución horizontal y vertical de aerosoles, su naturaleza, distribución de tamaños y propiedades ópticas.

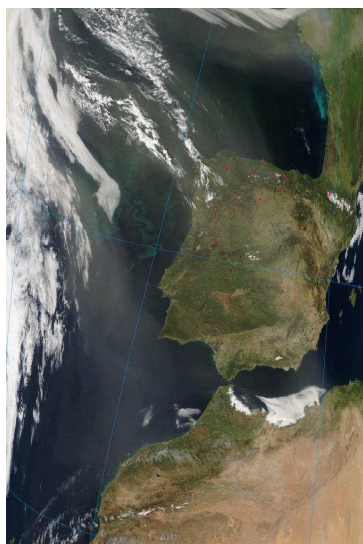


Fig. 7.- Imagen de color verdadero de MODIS correspondiente al 7 de abril de 2012 a las 18:00 U.T.C.

Predicción del polvo atmosférico

El Centro Regional facilita el acceso a predicciones de polvo mineral atmosférico elaboradas mediante distintos modelos numéricos. Para ello, en su página web incluye vínculos a las páginas donde se muestran estas predicciones. Además, también realiza tareas de intercomparación y evaluación de distintos sistemas de predicción. Actualmente recibe diariamente predicciones de concentración en superficie y DOD a 550 nm elaboradas por cinco modelos y se espera recibir en breve productos de otros dos modelos (tabla 1). Se trata de modelos muy distintos. Algunos de ellos son globales, otros regionales. La resolución horizontal varía desde los 0.33 grados de longitud por 0.33 grados de latitud de BSC-DREAM8b, DREAM8-NMME-MACC y NMMB/BSC-Dust hasta los 3.75 grados de longitud por 2.85° grados de latitud de LMDzT-INCA. También es variable el espectro de tamaños de partículas representado en cada modelo.

Modelo	Institución
BSC-DREAM8b (Pérez et al. (2006a, b)	BSC-CNS
CHIMERE (Bassagnet et al., 2009; Menut et al., 2009)	LMD
MACC (Morcrette et al, 2009; Benedetti et al, 2009)	ECMWF
DREAM-NMME-MACC (Nickovic et al., 2001)	SEEVCCC
NMMB/BSC-Dust (Pérez et al., 2011)	BSC-CNS
LMDzT-INCA (Schulz et al., 2009)	LSCE
MetUM	UK Met Office

Tabla 1.- Modelos que participan en la intercomparación y evaluación conjunta del Centro Regional.

Se consideran las predicciones de los distintos modelos para un área que abarca de 25° W a 60° E de longitud y de 0° a 65° N de latitud (Figura 8). Esta área de referencia intenta cubrir las principales fuentes de polvo de la región, las rutas de transporte más comunes y las zonas de deposición desde el ecuador hasta la Península Escandinava.

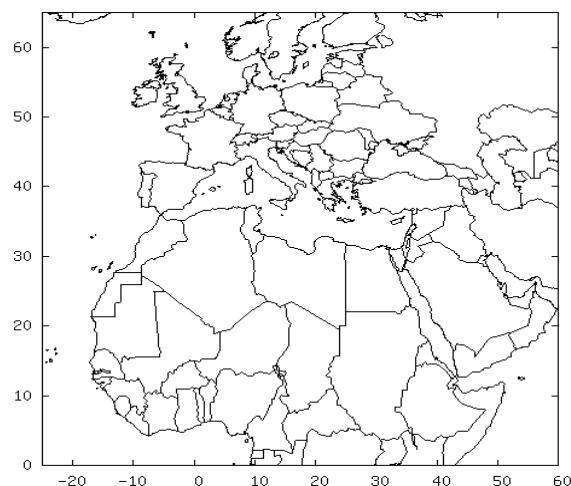


Fig. 8.- Área de referencia para la evaluación e intercomparación de modelos.

Para esta área de referencia se dibujan las predicciones trihorarias de los distintos modelos hasta un alcance de 72 horas utilizando una paleta de color común (Figura 9).

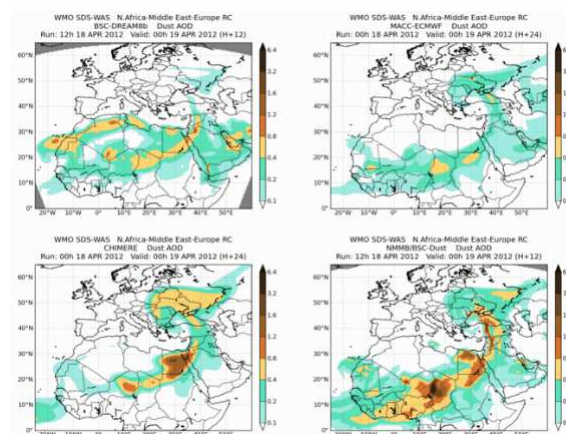


Fig. 9.- DOD a 550 nm previsto por BSC-DREAM8b (arriba izq.), MACC (arriba derecha), CHIMERE (abajo izq.) y NMMB/BSC-Dust (abajo derecha) para el día 19 de abril de 2012 a las 00 UTC.

Se incluye también un producto consistente en la mediana de los distintos modelos. Para generarlo, las distintas predicciones se interpolan linealmente a una rejilla de 0.5 x 0.5 grados y, para cada punto, se considera el valor mediano de los correspondientes a los distintos modelos.

Para evaluar el comportamiento de los diferentes sistemas, las predicciones de DOD se comparan a tiempo casi-real con los datos de AOD suministrados por la red AERONET para 36 estaciones que con frecuencia presentan niveles de polvo significativos (Figura 10). Se utilizan los productos AERONET Versión 2, nivel 1.5, lo que significa que las medidas realizadas bajo cielo nublado han sido automáticamente eliminadas, pero que las calibraciones finales no se han aplicado aún. Puesto que no todos los fotómetros de la red AERONET miden el AOD a 550 nm, esta variable se calcula a partir de los valores de AOD a 440, 675 y 870 nm y del exponente Ångström (AE) 440-870 utilizando la ley de Ångström. En cuanto a los modelos, los datos son interpolados linealmente a las coordenadas del punto de observación.

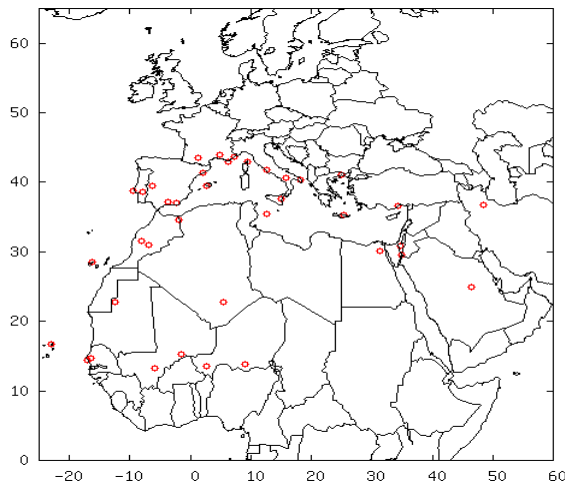


Fig. 10.- Estaciones AERONET para las que se evalúa el comportamiento de los modelos.

Puesto que se comparan medidas de AOD con predicciones de DOD, en los gráficos se incluyen los valores del AE 440-870 suministrados por la red AERONET (Figura 11). Estos valores permiten realizar una primera discriminación de las observaciones en que el polvo mineral es el aerosol dominante. En efecto, el polvo mineral suele dar lugar a valores de AE 440-870 inferiores a 0.6 mientras que la mayor parte de los otros aerosoles, los antropogénicos en particular, suelen dar lugar a valores de AE superiores a este umbral (Basart et al, 2009).

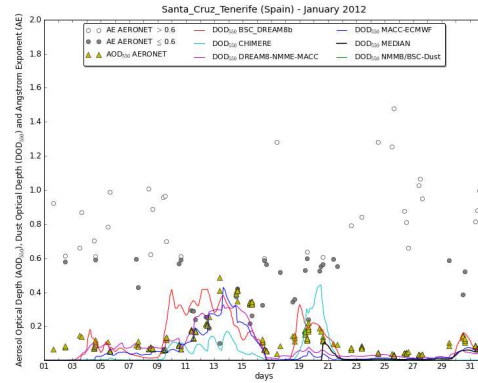


Fig. 11.- Evaluación conjunta de los distintos modelos durante el mes de enero de 2012 para Santa Cruz de Tenerife.

Además de la evaluación gráfica generada a tiempo casi-real, se realiza una evaluación mensual para conocer la desviación existente entre los resultados de los modelos (M_i) y los valores observados (O_i). Para descartar los casos en que el polvo no es el principal tipo de aerosol, la comparación se restringe a aquellas observaciones que presentan un AE inferior a 0.6. Los indicadores calculados son el sesgo medio (BE) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE).

$$BE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - O_i) \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - O_i)^2} \quad (2)$$

Estos valores se calculan para cada estación y para el conjunto de ellas. Es importante resaltar que:

- Aunque se usen sólo observaciones en que el polvo mineral es dominante, el AOD incluye el efecto de partículas de otra naturaleza (antropogénicas, sal marina, productos de combustión de biomasa, ...). Por ello, se puede esperar un valor negativo del BE.
- Los resultados para una sola estación pueden ser poco significativos por estar calculados a partir de un pequeño número de datos.
- El RMSE está muy influido por los casos con una gran diferencia entre observación y predicción. Especialmente en casos con presencia de valores atípicos, su utilidad es cuestionable y, en todo caso, su interpretación se hace difícil.

La tabla 2 muestra los resultados de evaluación correspondientes al mes de marzo de 2012.

Modelo	BE	RMSE
BSC-DREAM8b	-0.36	0.62
CHIMERE	-0.41	0.59
MACC	-0.39	0.57
DREAM-NMME-MACC	-0.20	0.45
NMMB/BSC-Dust	-0.15	0.50
Mediana	-0.35	0.53

Tabla 2.- Evaluación del DOD de los distintos modelos mediante observaciones AERONET correspondiente al mes de marzo de 2012

Otros productos derivados de modelos que se generan rutinariamente son los valores medios de concentración en superficie y de carga total de polvo en columna (Figura 12) con distintas bases temporales. Actualmente se realizan a partir del modelo BSC-DREAM8b, aunque en el futuro se podrán generar a partir de otros modelos.

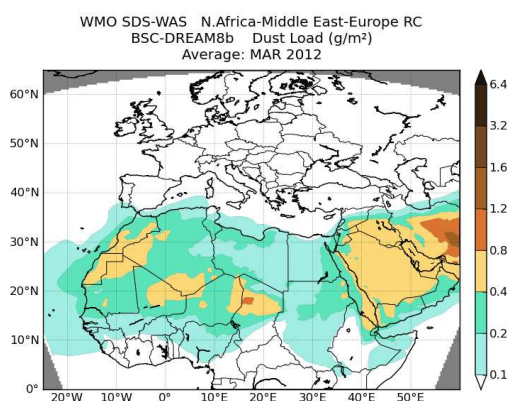


Fig. 12.- Valor medio mensual de la carga total de polvo en columna para el mes de marzo de 2012 elaborado a partir de las predicciones del modelo BSC-DREAM8b.

Distribución de los productos

El segundo objetivo del Centro Regional consiste en facilitar el acceso a la información. Para ello, gestiona un portal de internet (<http://sds-was.aemet.es>) que permite el acceso de usuarios a productos de observación y pronóstico, así como a otras fuentes de información. En particular, el portal ofrece a los Servicios Meteorológicos e Hidrológicos Nacionales la información necesaria para la emisión de avisos relacionados con alto contenido de polvo en la atmósfera. Proporciona también acceso a documentación del proyecto, material de formación, calendario de acontecimientos y noticias relacionadas.

Actividades de formación

El tercer objetivo del Centro Regional consiste en instruir a los países en el uso de las observaciones, análisis y predicciones suministrados.

Para ello, el Centro participa activamente en la organización, coordinación y realización de cursos

de formación en la región. Hasta el momento se han desarrollado las siguientes actividades formativas:

- Lectures on Atmospheric Mineral Dust and its Impact on Human Health, Environment and Economy, Barcelona, 13 noviembre 2010
- Training Week on WMO SDS-WAS products, Barcelona, 15-19 noviembre 2010
- Training on Meteorological Services, Sand and Dust Storm (SDS) Forecast and Early Warning System, Estambul, Turquía, 22-26 febrero 2011
- 2nd. Training Course on WMO SDS-WAS (satellite and ground observation and modelling of atmospheric dust), Antalya, Turquía, 21-25 noviembre 2011

Y próximamente:

- II Lectures on Atmospheric Mineral Dust, Barcelona, 5-9 noviembre 2012.

Agradecimientos

Damos las gracias a todos los socios del programa WMO SDS-WAS que han facilitado datos de observación, productos de modelos numéricos o cualquier otra información. Damos las gracias también a las instituciones que han participado en la organización y financiación de los cursos de formación: Organización Meteorológica Mundial, EUMETSAT, AEMET, BSC-CNS, Universitat Politècnica de Catalunya y Servicio Meteorológico Estatal de Turquía.

Referencias

- Basart, S., C. Pérez, E. Cuevas, J. M. Baldasano, and G. Paolo, 2009: Aerosol characterization in Northern Africa, Northeastern Atlantic, Mediterranean Basin and Middle East from direct-sun AERONET observations, *Atmos. Chem. Phys.*, **9**, 1–18
- Benedetti, A., J.-J. Morcrette, O. Boucher, A. Dethof, R. J. Engelen, M. Fisher, H. Flentjes, N. Huneus, L. Jones, J. W. Kaiser, S. Kinne, A. Mangold, M. Razinger, A. J. Simmons, M. Suttie, and the GEMS-AER team, 2009: Aerosol analysis and forecast in the ECMWF Integrated Forecast System. Part II: Data assimilation, *J. Geophys. Res.*, **114**, D13205, doi: 10.1029/2008JD011115.
- Bessagnet, B., L. Menut, G. Curci, A. Hodzic, B. Guillaume, C. Lioussé, S. Moukhtar, B. Pun, C. Seigneur, and M. Schulz, 2009: Regional modeling of carbonaceous aerosols over Europe - Focus on Secondary Organic Aerosols, *J. Atmos. Chem.*, **61**, 175-202.
- Brindley, H. E., and J. E. Russell, 2009: An assessment of Saharan dust loading and the corresponding cloud-free longwave direct

- radiative effect from geostationary satellite observations, *J. Geophys. Res.*, **114**, 148-227.
- Dubovik, O., A. Smirnov, B. N. Holben, M. D. King, Y.J. Kaufman, T. F. Eck, and I. Slutsker, 2000: Accuracy assessments of aerosol optical properties retrieved from AERONET sun and sky-radiance measurements, *J. Geophys. Res.*, **105**, 9791-9806.
- Gobbi, G. P., Y. J. Kaufman, I. Koren, and T. F. Eck, 2007: Classification of aerosol properties derived from AERONET direct sun data, *Atmos. Chem. Phys.*, **7**(2), 453-458.
- Legrand, M., A. Plana-Fattori, and C. N'doumé, 2001: Satellite detection of dust using the IR imagery of Meteosat 1. Infrared difference dust index, *J. Geophys. Res.*, **106**, 18251-18274.
- Menut, L., I. Chiapello, and C. Moulin, 2009: Previsibility of mineral dust concentrations: The CHIMERE-DUST forecast during the first AMMA experiment dry season, *J. Geophys. Res. - Atmospheres*, **114**, D07202, doi: 10.1029/2008JD010523
- Morcrette, J.-J., O. Boucher, L. Jones, D. Salmond, P. Bechtold, A. Beljaars, A. Benedetti, A. Bonet, J. W. Kaiser, M. Razinger, M. Schulz, S. Serrar, A. J. Simmons, M. Sofiev, M. Suttie, A. M. Tompkins, and A. Untch, 2009: Aerosol analysis and forecast in the ECMWF Integrated Forecast System. Part I: Forward modelling, *J. Geophys. Res.*, **114**, D06206, doi: 10.1029/2008JD011235.
- Nickovic, S., G. Kallos, A. Papadopoulos, and O. Kakaliagou, 2001: A model for prediction of desert dust cycle in the atmosphere, *J. Geophys. Res.*, **106**, 18113 - 18129.
- Perez, C., S. Nickovic, J. M. Baldasano, M. Sicard, F. Rocadenbosch, and V. E. Cachorro, 2006a: A long Saharan dust event over the western Mediterranean: Lidar, Sun photometer observations, and regional dust modeling, *J. Geophys. Res.*, **111**, D15214, doi: 10.1029/2005JD006579.
- Pérez, C., S. Nickovic, G. Pejanovic, J.M. Baldasano, and E. Ozsoy, 2006b: Interactive Dust-radiation Modeling: A Step to improve Weather Forecast, *J. Geophys. Res.*, **111**, D16206, doi: 10.1029/2005JD006717
- Pérez, C., K. Haustein; Z. Janjic; O. Jorba; N. Huneus; J. M. Baldasano; T. Black; S. Basart; S. Nickovic; R. L. Miller; J. P. Perlwitz; M. Schulz, and M. Thomson, 2011: Atmospheric dust modeling from meso to global scales with the online NMMB/BSC-Dust model-Part 1: Model description, annual simulations and evaluation, *Atmos. Chem. Phys.*, **11**, 13001-13027, doi: 10.5194/acp-11-13001-2011
- Schulz M., A. Cozic, and S. Szopa, 2009: LMDzT-INCA dust forecast model developments and associated validation efforts, *IOP Conf. Ser.:*

Earth Environ. Sci., **7** 012014, doi: 10.1088/1755-1307/7/1/012014.